Auswertung von Probebelastungen von baugrundverbessernden Säulen

Referenten

Dr.-Ing.
Friedemann Sandig
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (HTWK)

Dipl.-Ing. (FH)
Matthias Pamler
GEOMATION GmbH, Wilsdruff

M. Sc.
Sabrina Taubert
Forschungs- und Transferzentrum Leipzig (FTZ)

HTWK Leipzig

GEOMATION® Geotechnology & Automation GmbH

Auswertung von Probebelastungen baugrundverbessernder Säulen

Inhalt:

I. Einführung Begriff „Säule“, Tragverhalten

II. Prüfverfahren im Vergleich

III. Auswertung von Probelastungen

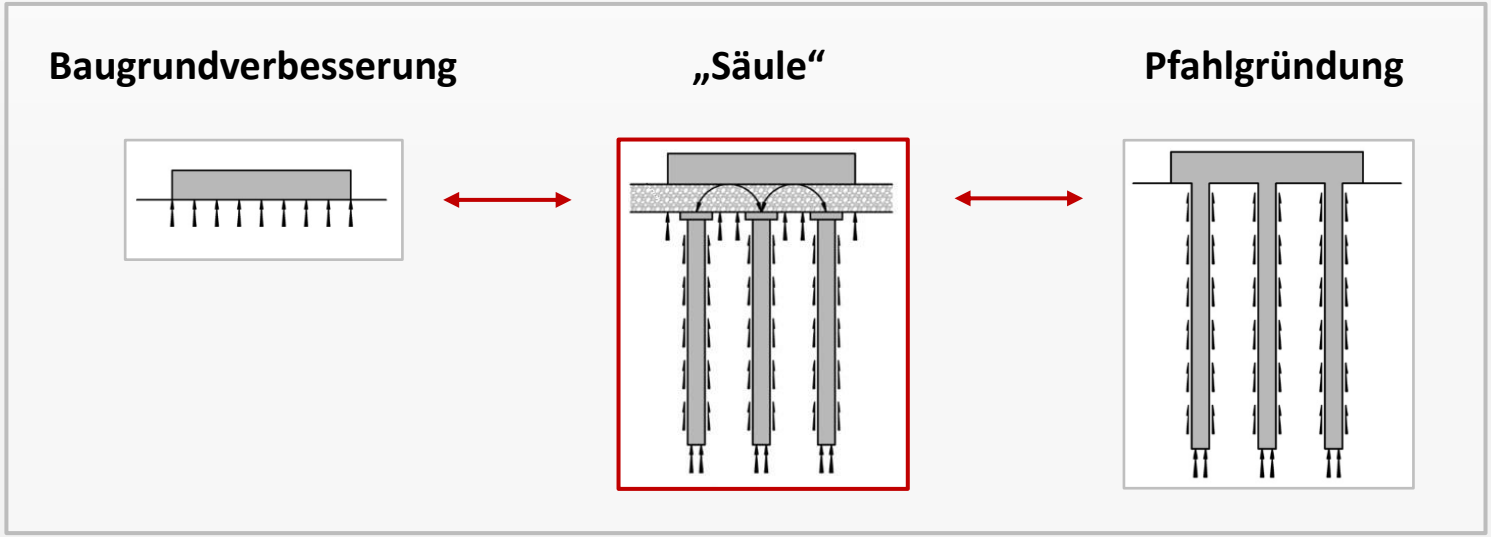
1. Laborversuche
2. Feldversuch / Großversuch A72

IV. Trends und neue Entwicklungen

V. Fazit

I. Begriff „Säule“

Einordnung der Säulen als pfahlartige Tragglieder (engl.: „rigid inclusions“)



I. Begriff „Säule“

(Bodenmisch-) Säulen

- Material: **Boden (-Bindemittel-) Gemische**, unbewehrt
- Herstellungsverfahren: **Vollverdrängung / Teilverdrängung**
- Bodenaufbereitung: **in-situ / ex-situ**
- Abtrag nur von **vertikalen Einwirkungen**
- Beteiligung des **umgebenden Bodens** am **Lastabtrag**
- Trennung vom Bauwerk durch **Lastverteilungsschicht**

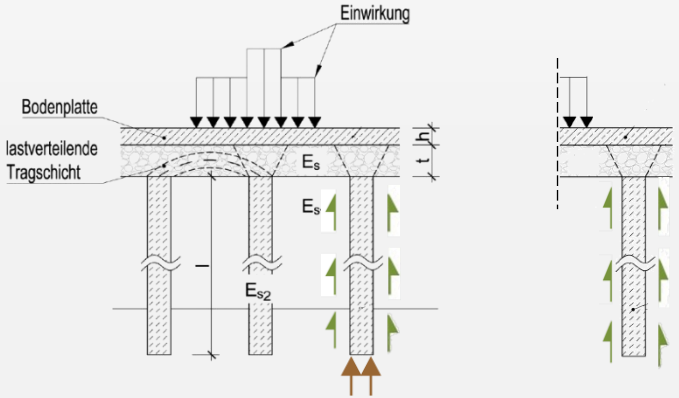
Warum?

- Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung
- Tragfähigkeitserhöhung
- <u>Setzungsreduzierung</u>

Säulenkopf nach Freigrabung, Durchmesser: 40 cm

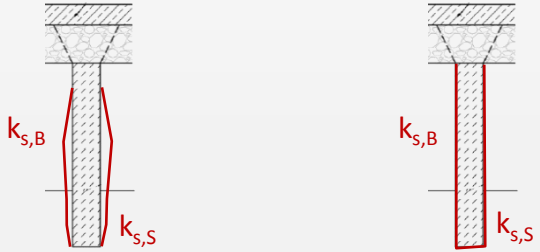
I. Tragverhalten

„aufstehendes“ System ↔ „schwimmendes“ System



Tragwirkung durch **Mantelreibung** und/oder **Spitzendruck**

„weiche“ Säulen $k_{s,S}/k_{s,B} \leq 50$ ↔ „steife“ Säulen $k_{s,S}/k_{s,B} > 50$



Fallunterscheidung in Abhängigkeit des **Steifigkeitsverhältnisses** zwischen **Bettungsmodul der Säulen** und **Bettungsmodul des Bodens**

I. Arbeitsgruppe

HTWK Leipzig

GEOMATION® Geotechnology & Automation GmbH

Erarbeitung und Veröffentlichung der Bemessungsgrundlagen durch …

DGGT Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. German Geotechnical Society

TC250/SC7/EG14
Evolution Group 14 „Ground Improvement“

Überarbeitung des Eurocode 7 (Veröff. 2020)

- diskrete, im Baugrund hergestellte Elemente
- definierte geometrische und mechanische Eigenschaften
- steifer als der umgebende Baugrund
- Entkopplung vom Bauwerk durch lastverteilende Schicht

Arbeitskreis 2.8 „Stabilisierungssäulen“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT)

Merkblatt für Stabilisierungssäulen (Planung, Bemessung und Nachweisführung)

- Trockenmörtelsäulen
- Nassmörtelsäulen
- hydraulisch gebundene Stopfsäulen
- Bodenmischsäulen

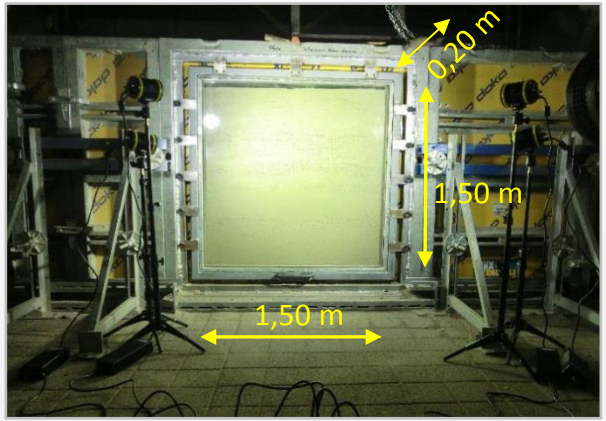
I. Arbeitsgruppe

Prof. Dr. Reitmeier
(ehem. HTWG Konstanz)

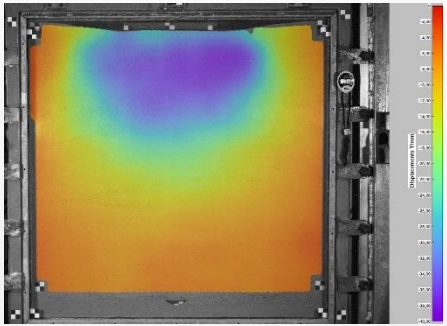
Unabhängige Arbeitsgruppe mit den Zielsetzungen …

- **Erfahrungsaustausch** und **Forschungsbegleitung**
- Weiterentwicklung des **weggesteuerten Prüfverfahrens**
- Messgeräteentwicklung (**MHD 300**, Software, Datenauswertung)
- **Praxiserfahrung**
- Einbindung in die **Lehre**

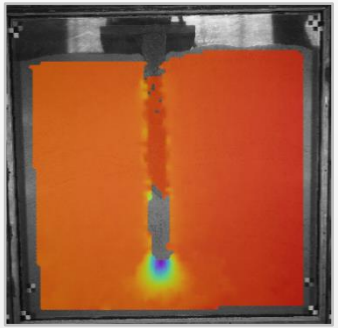
I. Tragverhalten



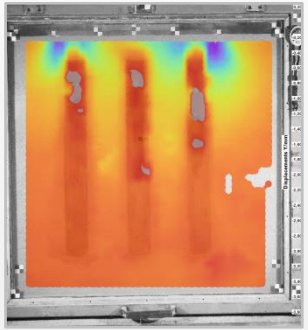
Versuchsstand für optische Bewegungsmessungen (HTWK Leipzig)



Spannungsverteilung im unverbesserten Boden



Vertikale Verschiebungen bei Belastung einer **Einzelsäule**



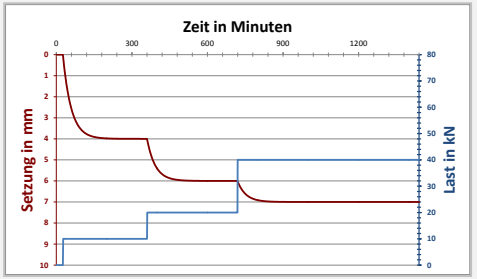
Vertikale Verschiebung bei Belastung einer **Säulengruppe**

- max. aufnehmbare Spannung σ_{max} = ca. 600 kN/m²
- Verkleinerung der max. Dehnung in den Säulenköpfen durch Einbau Lastverteilungsschicht (nur vert. Spannungen!)
- Dimensionierungshilfe für Großversuch

II. Prüfverfahren

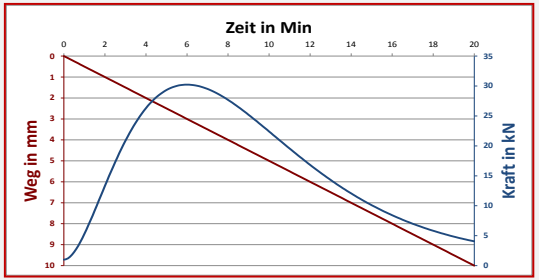
Lastgeregelte Prüfverfahren

- konventionelle Methode
- stufenweise Belastung mit Abbruchriterium



Weggeregelte Prüfverfahren

- konstante Vorschub-geschwindigkeit
- kontinuierliche Lasterhöhung

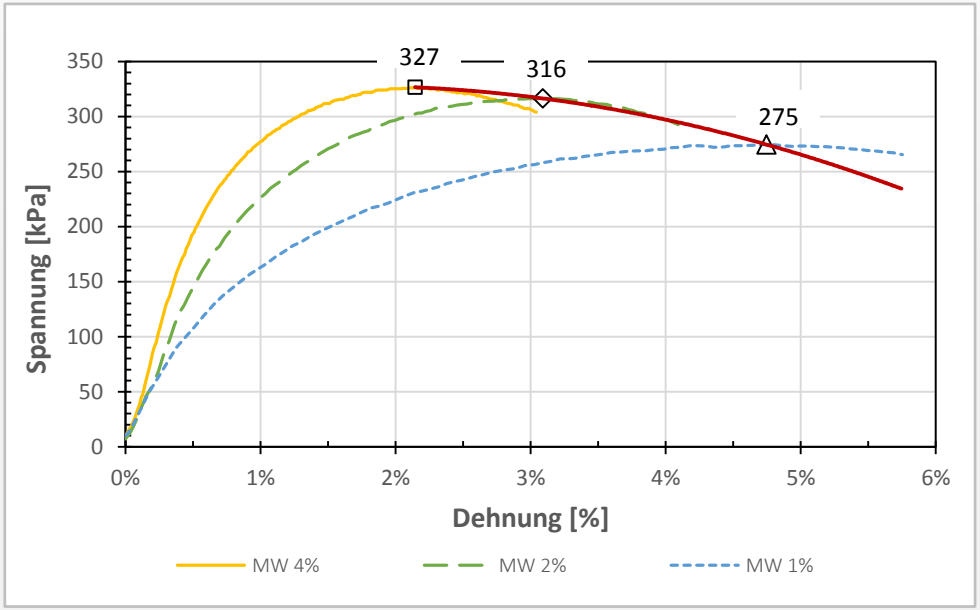


Vorteile

- kontinuierliche Last-Setzungs-Kurve
- detaillierte Informationen über Tragverhalten
- kurze Versuchsdurchführung
- exakt kalkulierbare Kosten
- Prognose zum Langzeitverhalten

III. Auswertung von Probebelastungen

Einfluss der Prüfgeschwindigkeiten

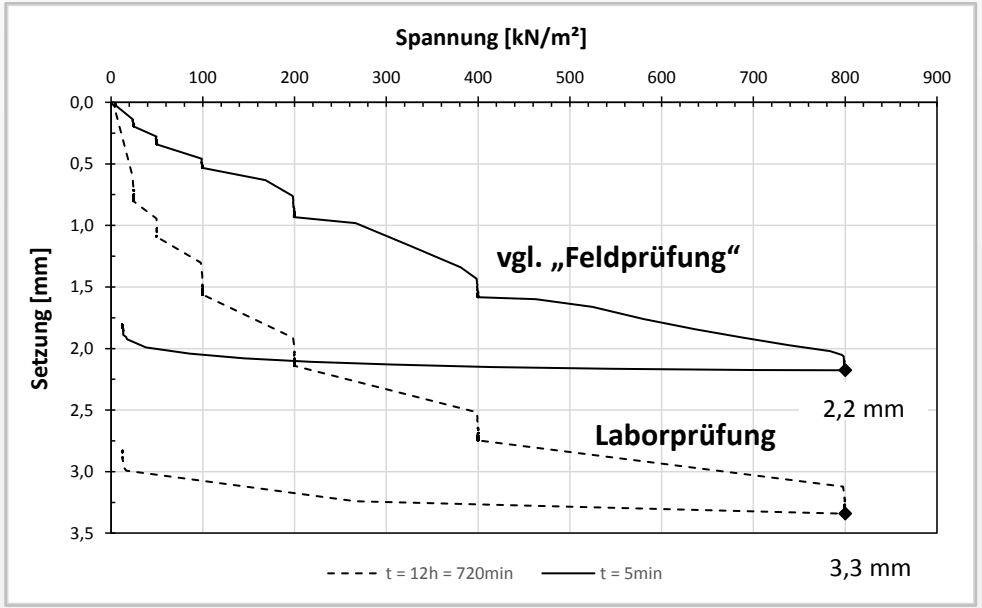


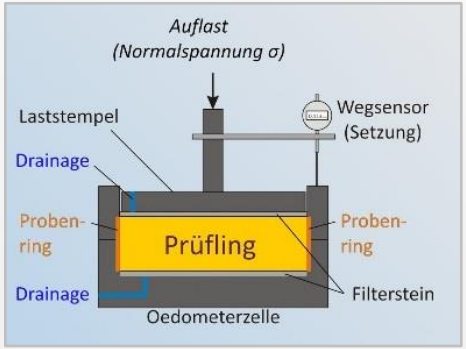
Bruchkörper, Einaxialer Druckversuch

Höhere Prüfgeschwindigkeiten erzeugen **höhere Bruchfestigkeiten** bei **geringeren Bruchdehnungen**

III. Auswertung von Probebelastungen

Einfluss der Prüfdauer



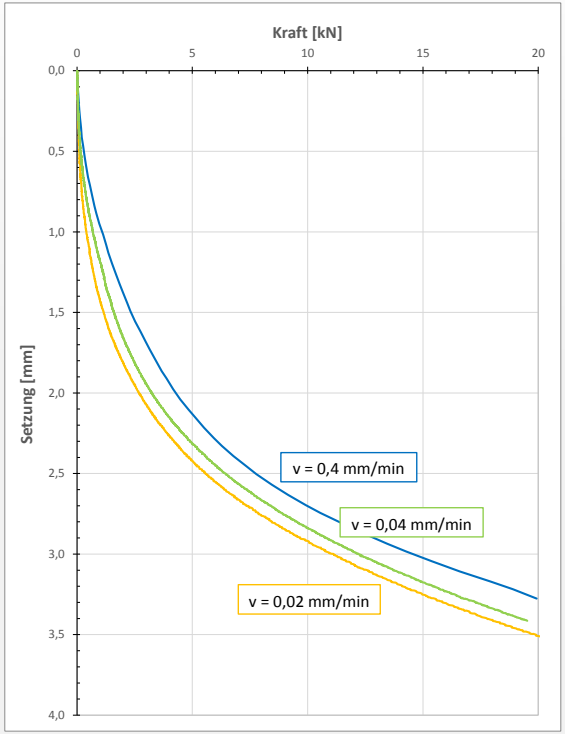


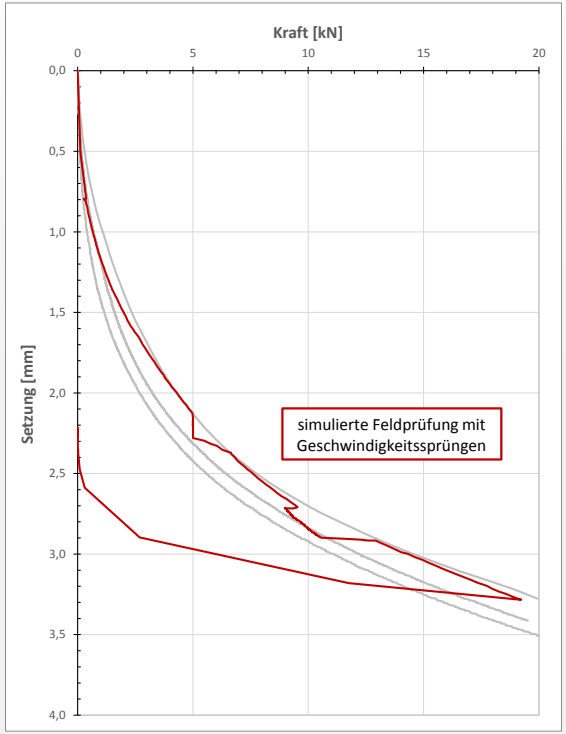
schematische Darstellung einer Ödometerzelle und Prüfkörper

Lange Prüfzeiten bewirken **größere Setzungswerte**
Kurze Prüfzeiten vernachlässigen **Kriechsetzungen**

→ **realitätsgetreue Darstellung durch Langzeitprüfung**

III. Auswertung von Probebelastungen



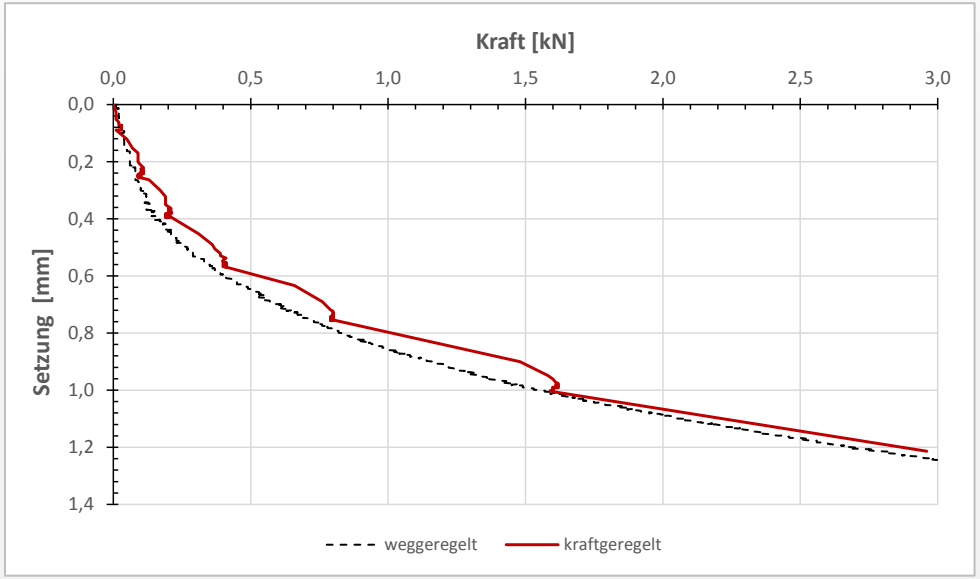


Theorie basierend auf **Krieg/Goldscheider**:

- Langsamere Prüfgeschwindigkeit erzeugt Verschiebung der Isotache zu höheren Setzungen → weicheres Materialverhalten
- Pfadunabhängigkeit bei monotoner Verformung
- Kriechzeitermittlung durch Geschwindigkeitssprünge
- Prüfdauer: ca. 0,5 bis 1 h im Feld

III. Auswertung von Probebelastungen

Gleichwertigkeit Kraft- und weggesteuerter Belastungsversuche



- ***Weggeregelter Versuch*** ------
  Vorschubgeschwindigkeit 0,02 mm/min
- ***Kraftgeregelter Versuch*** ———
  Abbruchkriterium bei einer Setzung von 0,1 mm in 5 Minuten
- Jeder Punkt am Ende einer Laststufe kann auch durch eine konstante Vorschubgeschwindigkeit erreicht werden.

III. Auswertung von Probebelastungen

Großversuch Bodenmischsäulen

Quelle: Leipziger Volkszeitung (www.lvz.de)

- Probefeld etwa 14 km südlich von Leipzig
- ehemaliger Braunkohletagebau
- vor etwa 25 Jahren Beginn Umnutzung als Seenlandschaft
- schlecht tragfähiger Boden

III. Auswertung von Probebelastungen

Säulenherstellung im Oktober 2017 in Zusammenarbeit mit BAUER Spezialtiefbau

Herstellung der Einzelsäulen

III. Auswertung von Probebelastungen

Betonage der Dauerbelastungsstände und Aufbau der Belastungseinrichtung (November/Dezember 2017)

III. Auswertung von Probebelastungen

Dauerbelastungsstände

Überwachung der Bodenaktivität durch

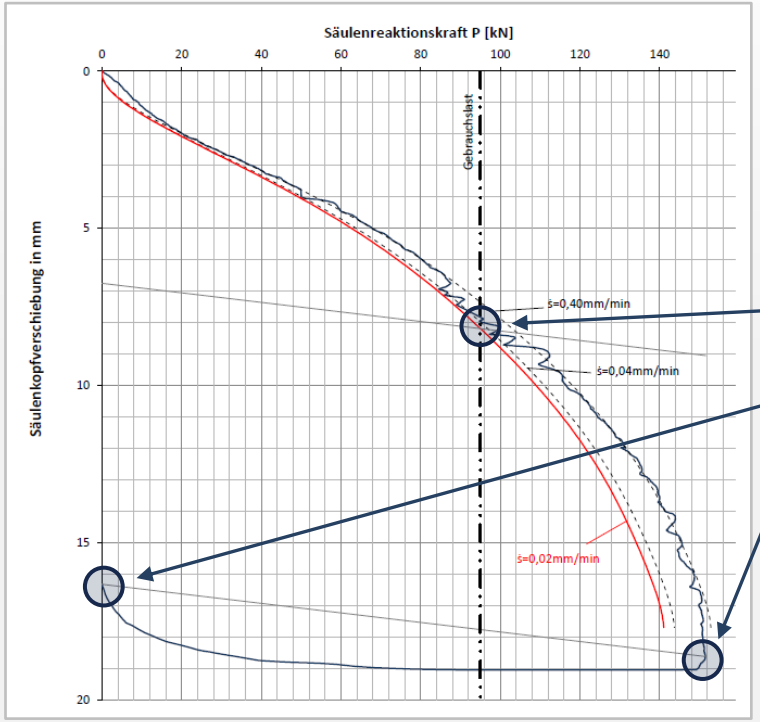
- Horizontalinklinometer
- Extensometer
- Kraftmessgeber
- Setzungspegel
- Nivellementmessungen

III. Auswertung von Probebelastungen

Tag 1 - kraftgeregelte, „konventionelle“ Einzelsäulenprüfung in Zusammenarbeit mit FUGRO Deutschland

Tag 2 - Weggeregelter Belastungsversuch in Zusammenarbeit mit GEOMATION und LAUMER

III. Auswertung von Probebelastungen



Parameter	Säule E2
Säulenlänge	10,70 m
Säulendurchmesser	0,40 m
Suspensionsmenge	1,89 m³
Abweichung Masse-%	+ 36,96 %
Kriechmaß k_s	0,217 mm
Zähigkeitsindex I_v	0,026
Prüfgeschwindigkeit	0,4 (0,04) mm/min
Säulenkopfverschiebung bei Gebrauchslast (95 kN)	7,9 mm
Säulenkopfverschiebung nach Entlastung	16,3 mm
maximale Säulenkopfverschiebung bei einer Belastung von	18,6 mm 151,5 kN
Plastischer Anteil	87,65 %
Elastischer Anteil	12,33 %
Bettungsmodul	112 kN/m³
Steifemodul E_s	2797 kN/m²
Steifemodul E_s „korrigiert“	2467 kN/m²

Beispielhafte Auswertung eines Belastungsversuches

Bettungsmodul

$$\frac{k_{s,Säule}}{k_{s,Boden}} = 22{,}4 < 50$$

„weiche“ Säulen
$k_{s,S}/k_{s,B} \leq 50$

IV. Prüftechnik, Methoden & Trends

Mögliche Beurteilung der Tragfähigkeit einzelner Säulen mit aktueller Prüftechnik

Ausschnitt aus Säulengruppe

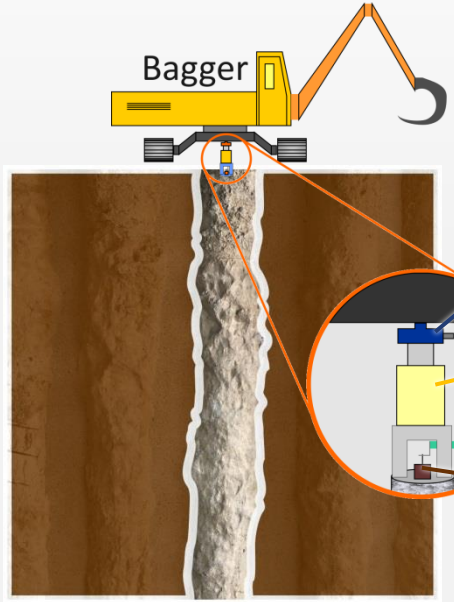
- Prüfanordnung im Feld - Schematischer Aufbau & Praxis
- Auswertung weggeregelter Belastung mit Langzeitabschätzung
- Zusammenfassung & Ausblick

IV. Prüftechnik, Methoden & Trends

HTWK Leipzig

GEOMATION® Geotechnology & Automation GmbH

Prüfanordnung zur Belastung einer Säule



- Vertikale Belastung
- Vertikale Bewegung

Kraftsensor

Hydraulik-zylinder

Wegsensor

Säulenprüfung: Montage der Prüfanordnung

Weitere Säulenköpfe

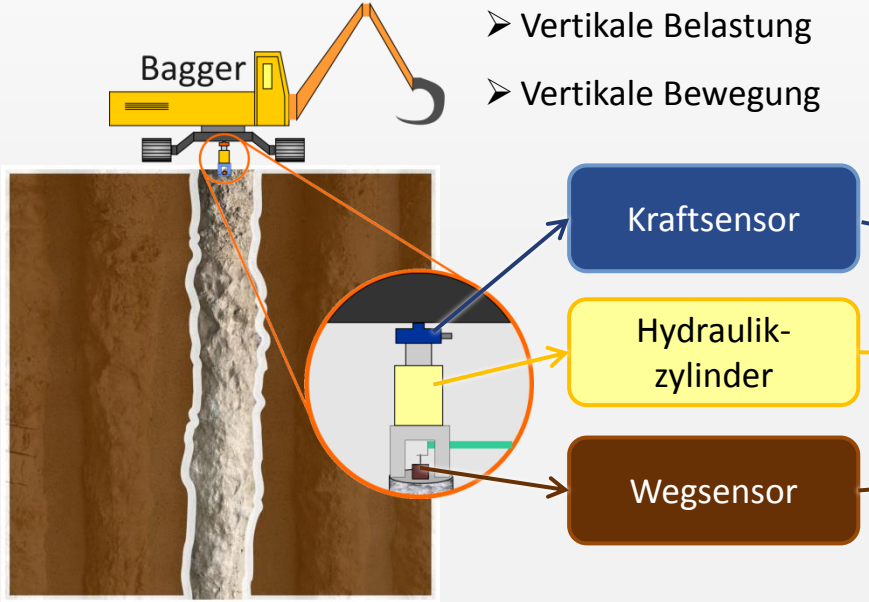
IV. Prüftechnik, Methoden & Trends

HTWK Leipzig

GEOMATION® Geotechnology & Automation GmbH

Prüfanordnung zur Belastung einer Säule

- Vertikale Belastung
- Vertikale Bewegung

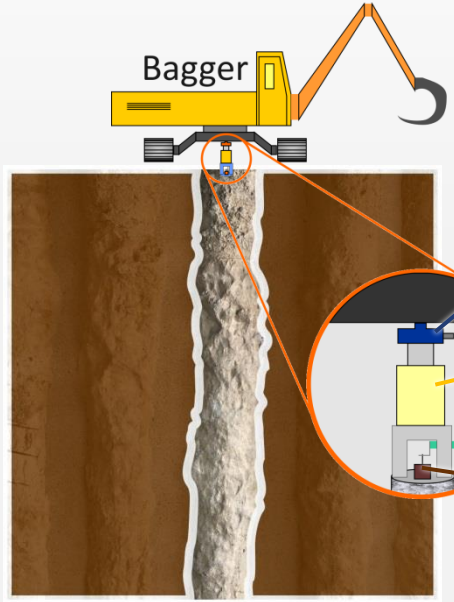


IV. Prüftechnik, Methoden & Trends

HTWK Leipzig

GEOMATION® Geotechnology & Automation GmbH

Prüfanordnung zur Belastung einer Säule



- Vertikale Belastung
- Vertikale Bewegung

Kraftsensor

Hydraulik-zylinder

Wegsensor

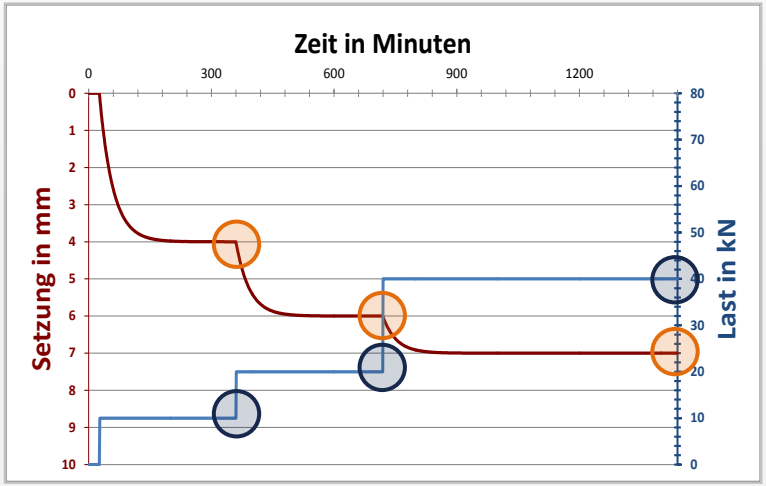
MHD300.CSV

- Integrierte **Hydraulik**
- Integrierter Multiregler (**Kraft- und Wegregler**)
- Prüfung im Feld
  → Kompakter Aufbau

Notebook mit Software

IV. Prüftechnik, Methoden & Trends

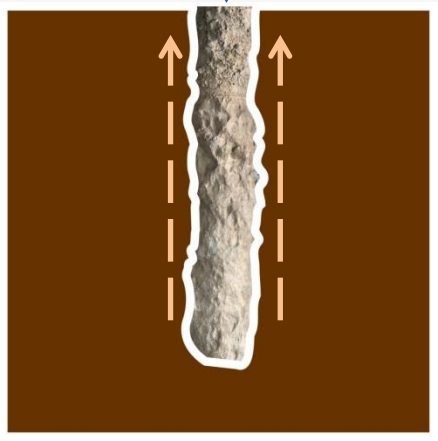
Auswertung weggeregelter Belastung mit Langzeitabschätzung



Schematische Darstellung konstante Last

Belastung mit F

Beobachtung → Δs

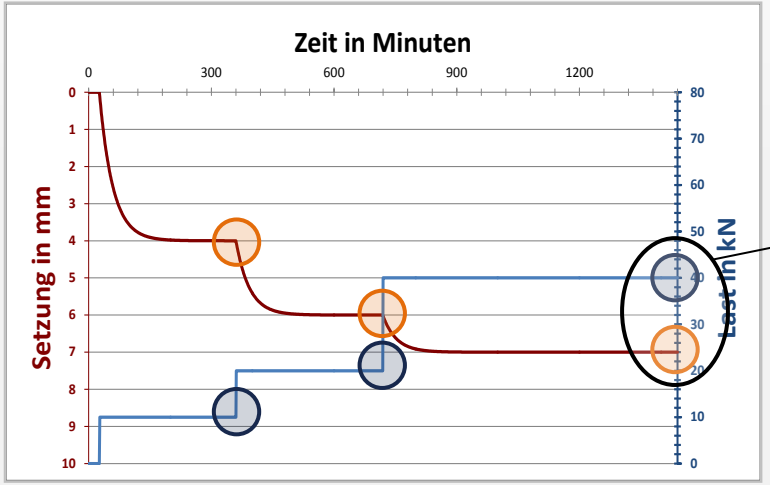


Schwimmende Säule

- Wertepaare am Ende einer Laststufe werden in ein Last-Weg-Diagramm übertragen

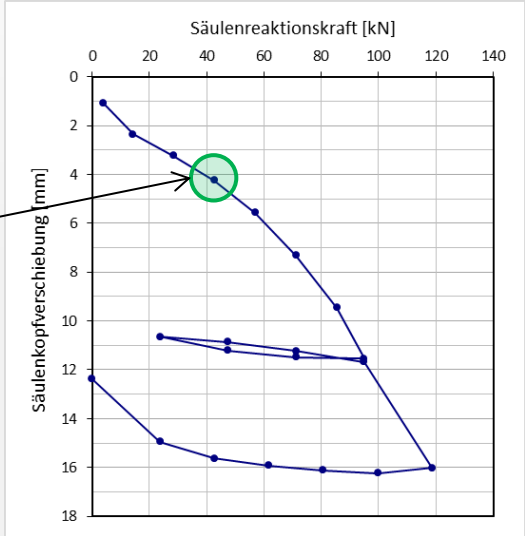
IV. Prüftechnik, Methoden & Trends

Auswertung weggeregelter Belastung mit Langzeitabschätzung



Schematische Darstellung konstante Last

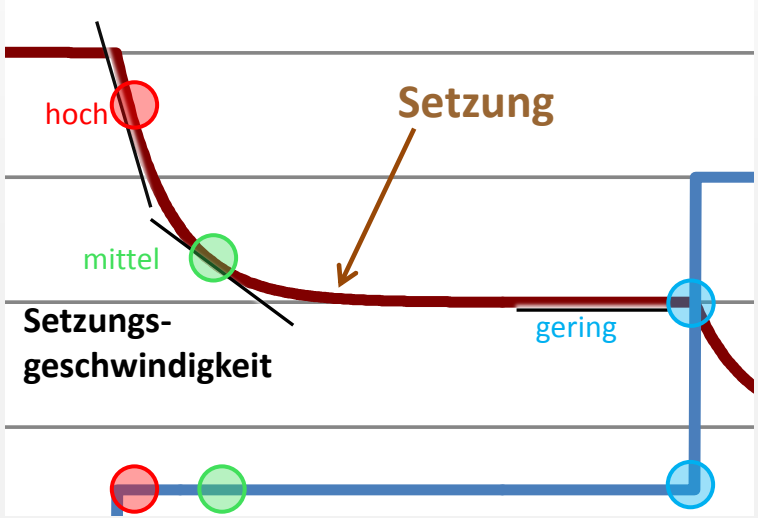
- Laststufe wird bei geringer Setzungs-geschwindigkeit beendet
- Ein Wertepaar entspricht 1 Punkt im Kraft-Weg-Diagramm



Last-Weg-Diagramm der Säule E3 (Probefeld A72)

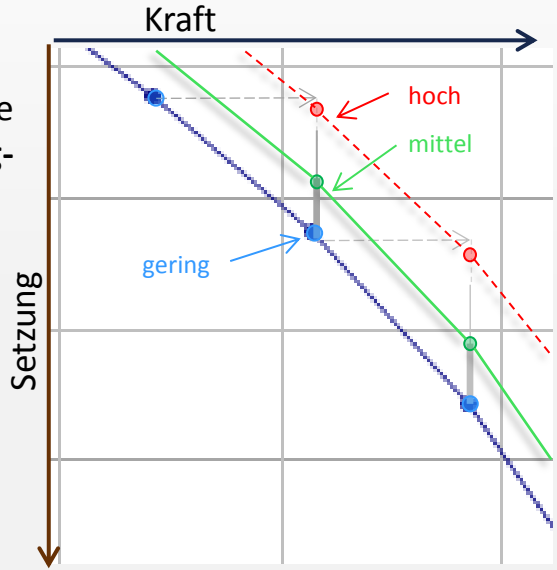
IV. Prüftechnik, Methoden & Trends

Auswertung weggeregelter Belastung mit Langzeitabschätzung



Schematische Darstellung konstante Last

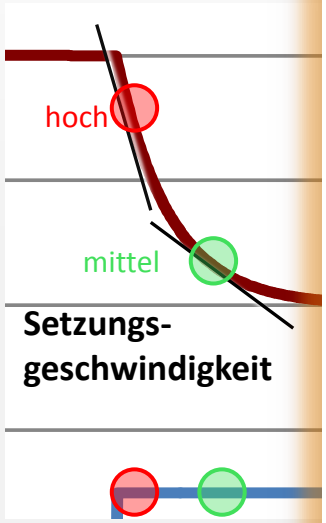
- Zu jeder **Last** und **Setzung** lässt sich eine **Setzungsgeschwindigkeit** zuordnen

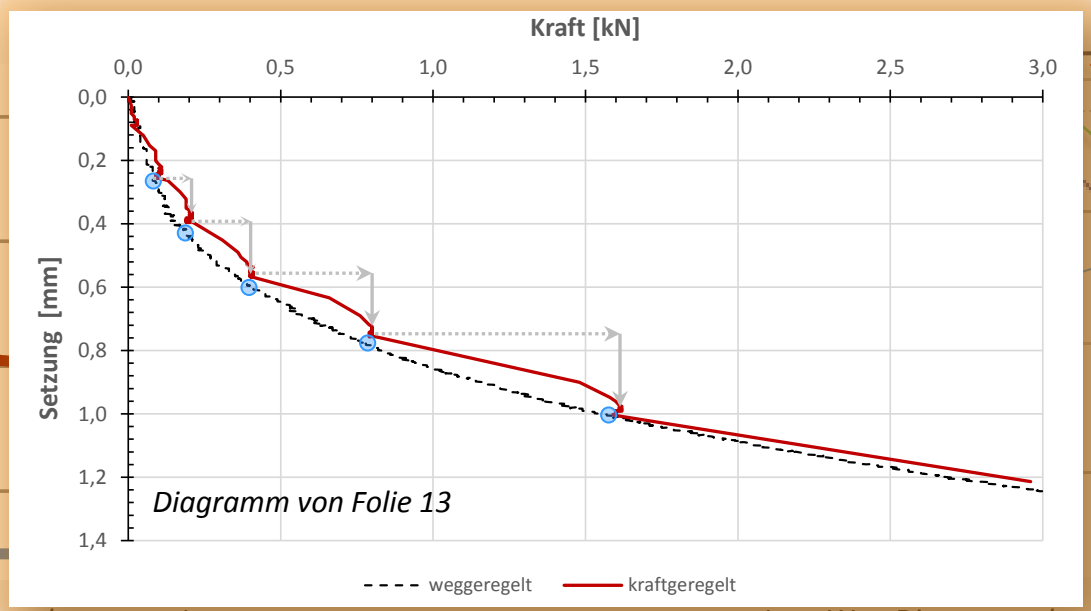


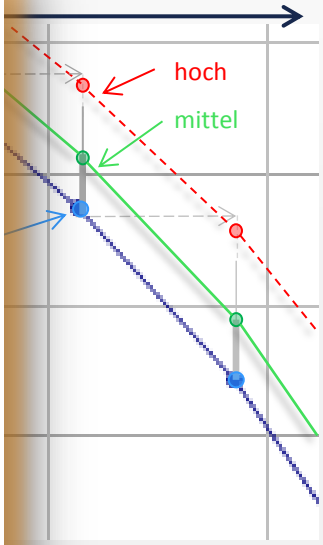
Last-Weg-Diagramm der Säule E3 (Probefeld A72)

IV. Prüftechnik, Methoden & Trends

Auswertung weggeregelter Belastung mit Langzeitabschätzung





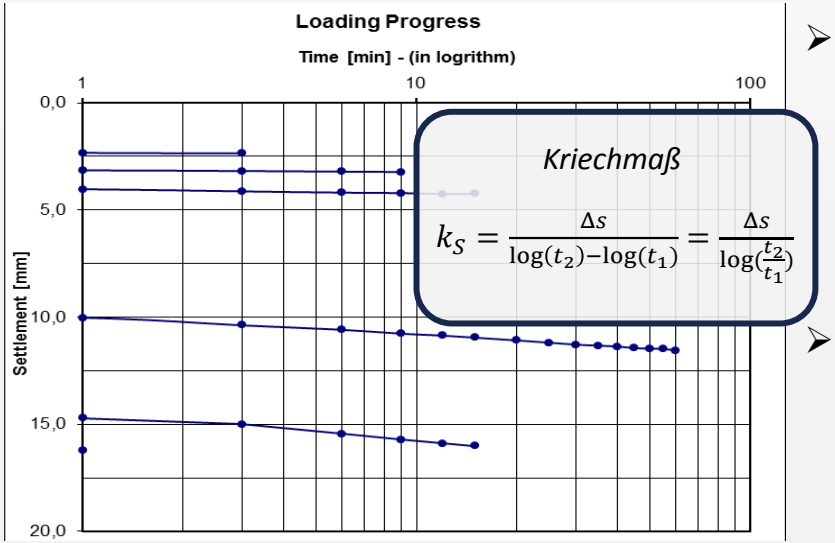


Schematische Darstellung konstante Last

Last-Weg-Diagramm der Säule E3 (Probefeld A72)

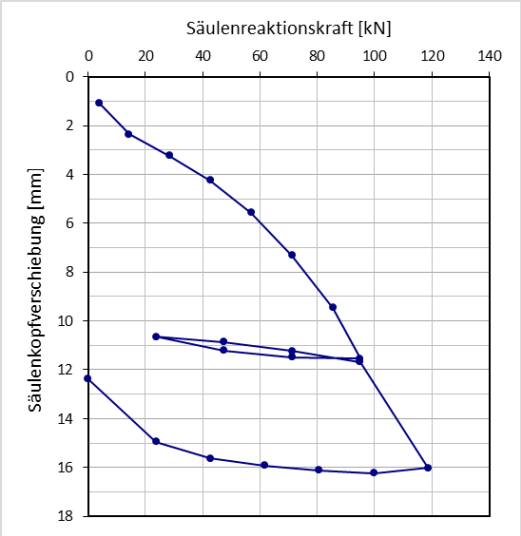
IV. Prüftechnik, Methoden & Trends

Auswertung weggeregelter Belastung mit Langzeitabschätzung



Schematische Darstellung konstante Last

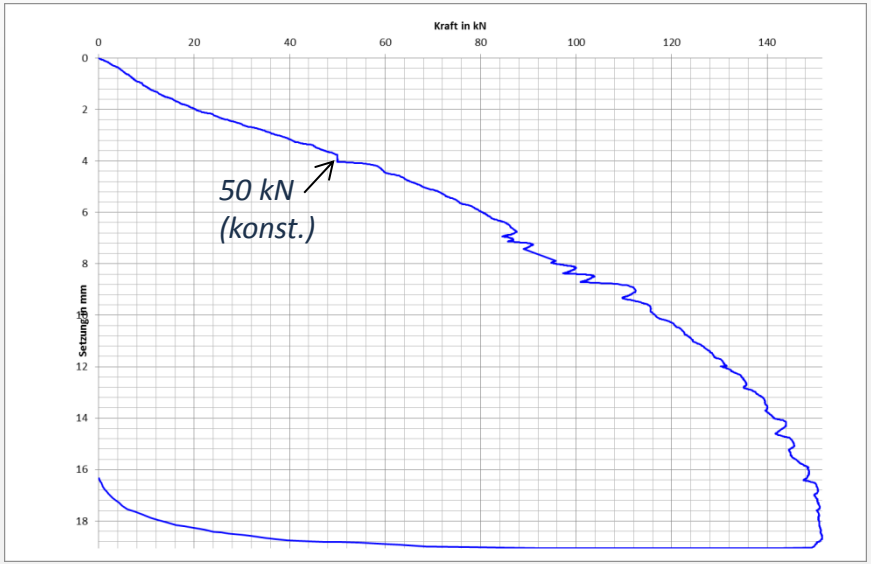
- Zu jeder **Last** und **Setzung** lässt sich eine **Setzungsgeschwindigkeit** zuordnen
- Logarithmische Darstellung des Zeit-Setzungsverhaltens für jede Laststufe



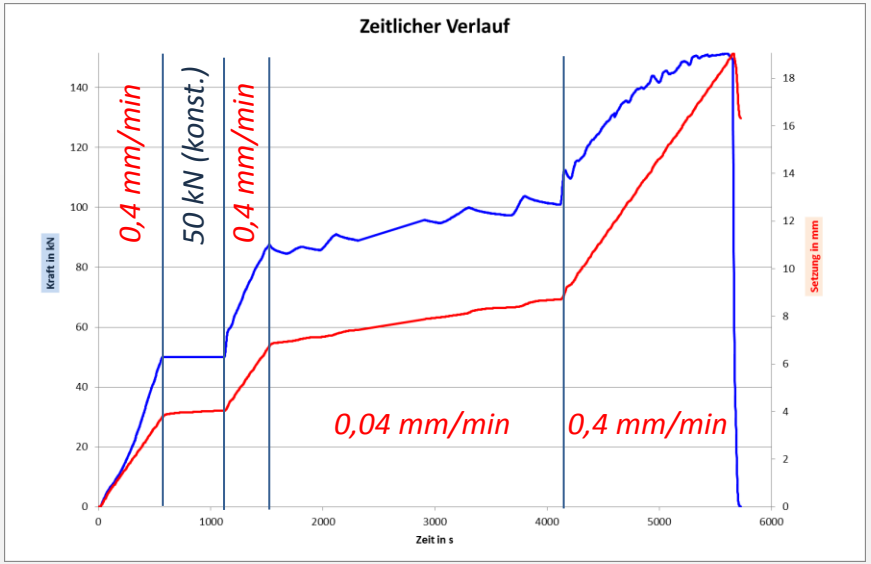
Last-Weg-Diagramm der Säule E3 (Probefeld A72)

IV. Prüftechnik, Methoden & Trends

Auswertung weggeregelter Belastung mit Langzeitabschätzung



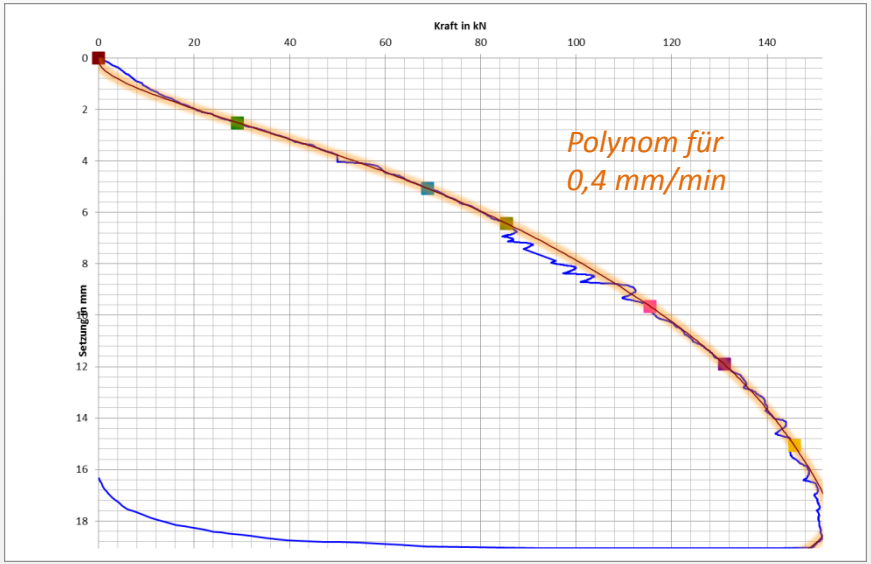
Last-Weg-Diagramm der Säule E2 (Probefeld A72)



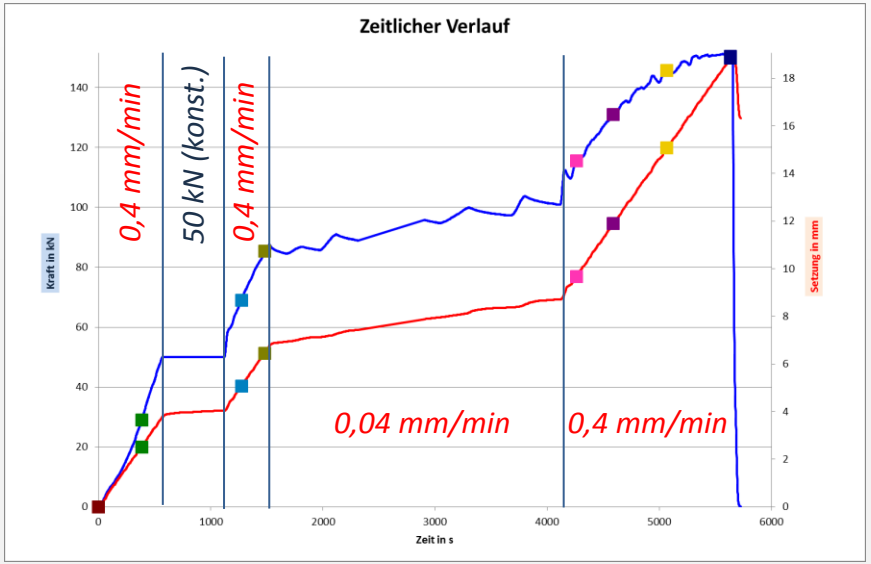
Zeitverlauf der Prüfung von Säule E2 (Probefeld A72)

IV. Prüftechnik, Methoden & Trends

Auswertung weggeregelter Belastung mit Langzeitabschätzung



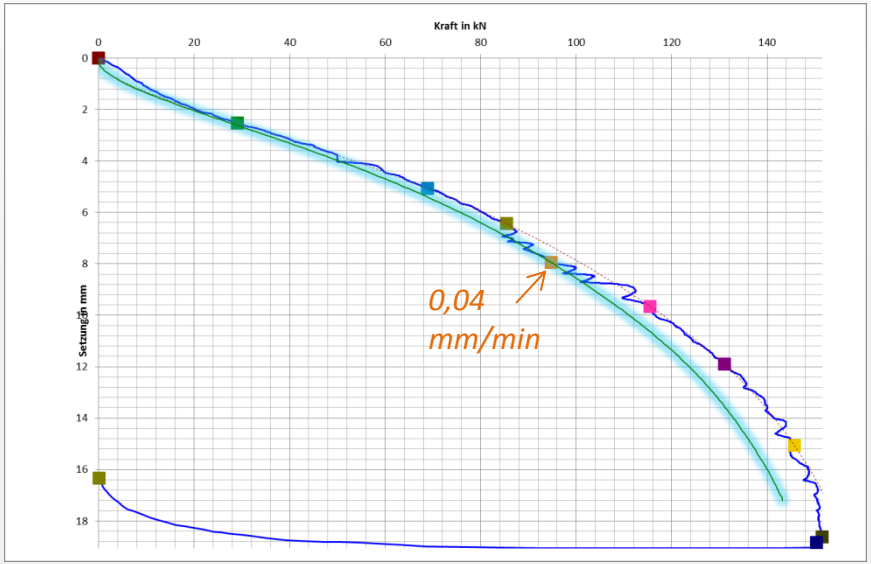
Last-Weg-Diagramm der Säule E2 (Probefeld A72)



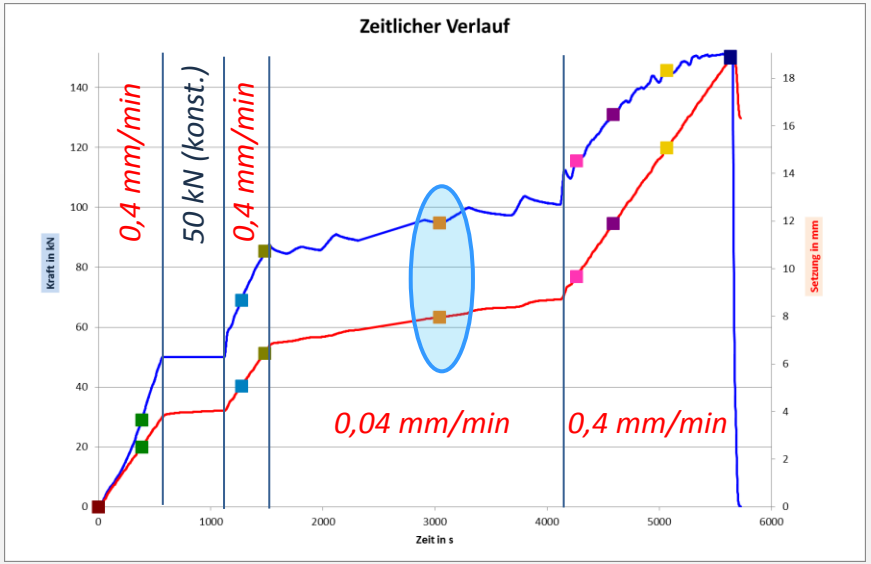
Zeitverlauf der Prüfung von Säule E2 (Probefeld A72)

IV. Prüftechnik, Methoden & Trends

Auswertung weggeregelter Belastung mit Langzeitabschätzung



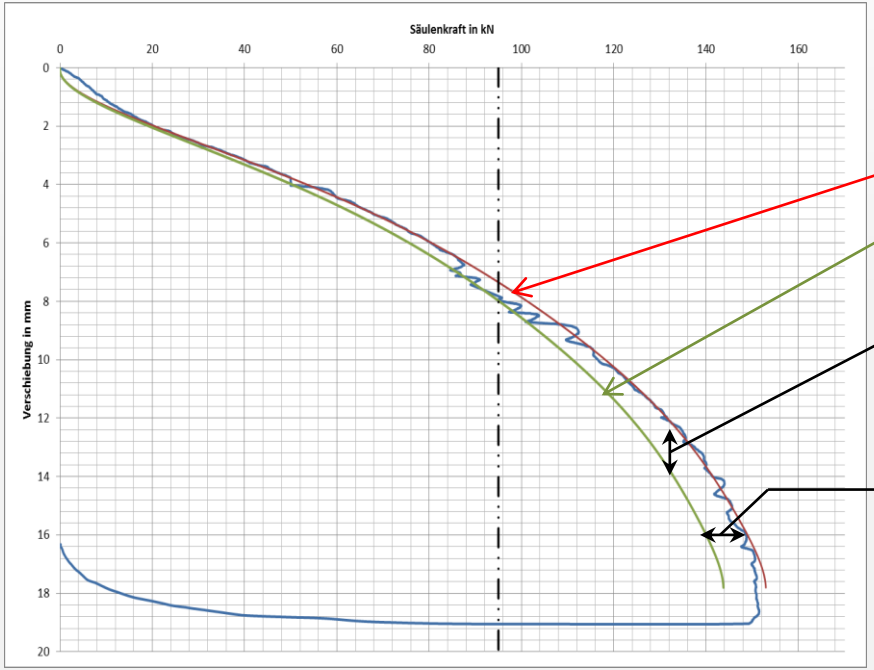
Last-Weg-Diagramm der Säule E2 (Probefeld A72)



Zeitverlauf der Prüfung von Säule E2 (Probefeld A72)

IV. Prüftechnik, Methoden & Trends

Auswertung weggeregelter Belastung mit Langzeitabschätzung



ISOTACHE: 0,4 mm/min

ISOTACHE: 0,04 mm/min

Ermittlung des Kriechmaß aus vertikalen Abständen der Isotachen

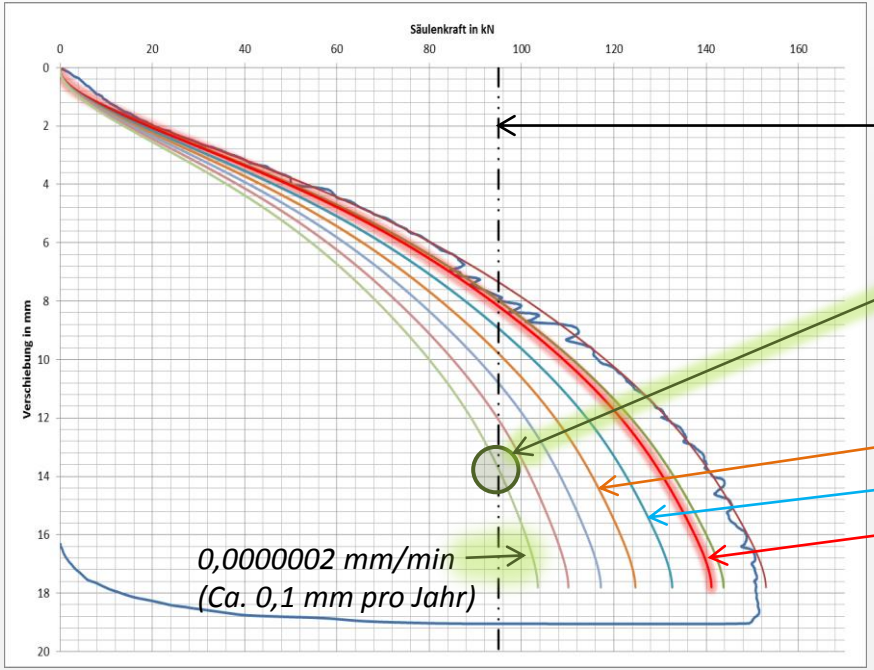
- *Kriechmaßes über die Last darstellbar (Verlauf des Kriechmaß)*

Aussage über Zähigkeit

Last-Weg-Diagramm der Säule E2 (Probefeld A72)

IV. Prüftechnik, Methoden & Trends

Auswertung weggeregelter Belastung mit Langzeitabschätzung



Gebrauchslast: 95 kN

Beispiel: Langzeitabschätzung bei Gebrauchslast

Setzung:	*ca. 13,6mm*
Setzungsgeschwindigkeit:	*ca. 0,1mm pro Jahr*

$$\frac{13{,}6\ \text{mm}}{0{,}1\ \text{mm pro Jahr}} = \underline{\mathbf{136\ Jahre}}$$

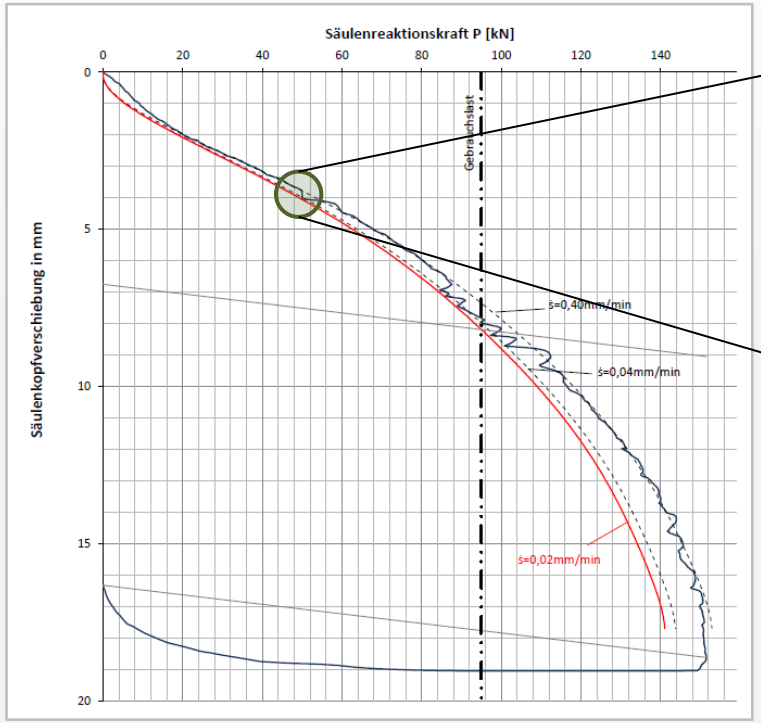
0,0002 mm/min

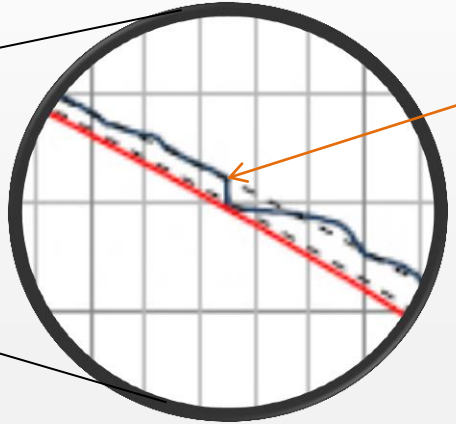
0,002 mm/min

0,02 mm/min

Last-Weg-Diagramm der Säule E2 (Probefeld A72)

IV. Prüftechnik, Methoden & Trends





Kontrollpunkt:

- *Konstante Last: 50 kN*
- *Verbindet beide Isotachen miteinander*

Last-Weg-Diagramm der Säule E2 (Probefeld A72)

V. Fazit

Notwendigkeit der Sammlung von Erfahrungswerten, sowie Optimierungen in den Bereichen …

- Ressourcen-nutzung
- technologische Prozesse
- Tragverhalten, Bemessung
- Qualitäts-sicherung

Realisierung durch …

- Baustellenprüfungen
- Forschungsvorhaben
- Normen-/Merkblätter

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Reitmeier

V. Fazit

Notwendigkeit der Sammlung von Erfahrungswerten, sowie Optimierungen in den Bereichen …

- Ressourcen-nutzung
- technologische Prozesse
- Tragverhalten, Bemessung
- Qualitäts-sicherung

Realisierung durch …

- Baustellenprüfungen
- Forschungsvorhaben
- Normen-/Merkblätter

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Reitmeier